DOI:10.11931/guihaia.gxzw202407013

谷子产量和元素间相互关系对叶面施硒的响应

薛晨阳[1]，王晨曦[1,2]，张宇辰[1,3]，张锶[1]，杜颜[1]，李晓军[1*]

（1. 中国科学院沈阳应用生态研究所，中国科学院污染生态与环境工程重点实验室，沈阳，110016；2. 内蒙古科技大学 能源与环境学院，内蒙古 包头，014000；3. 沈阳建筑大学 市政与环境工程学院，沈阳，110168）

摘　要：硒(Selenium, Se)是人类必不可少的微量元素，摄入富硒农产品是有效补充人体所需Se的最佳方式。为了促进富硒作物规模化生产和品质提升，该研究以谷子(*Setaria italica*, 张杂谷-10号)为研究对象，在拔节期和灌浆期叶面喷施不同浓度的商品化硒肥，测定谷子硒含量和产量，分析并阐述植株元素间的相互作用关系。结果表明：（1）外源叶面喷施硒肥可以显著提高籽粒中的Se含量和谷子产量。（2）在灌浆期按照30.75 $g \cdot hm^{-2}$(以Se记)叶面喷施1次，相比较对照可使籽粒Se含量提升3.7倍，满足富硒农产品标准。（3）谷子穗重和出米率分别显著提高11.31%和17.34%。（4）叶面施硒显著改变了植株叶片、茎秆、叶鞘及籽粒中的元素含量和相互关系，元素间正相关作用比例显著增加。（5）钙和硫离子随硒肥浓度的增加呈现下降趋势，而铁、铜及锌离子呈现出低浓度促进，高浓度抑制现象。叶片和籽粒中硫离子含量的降低可能与Se含量升高密切相关，二者在植物体内运输和代谢途径中存在竞争关系。综上表明，该研究所用硒肥可有效提高谷子Se含量和产量，生产过程中应适当增加土壤硫肥来补充籽粒中降低的硫元素。该研究结果为富硒肥料配比的完善，富硒谷子的生产及营养调控提供了实际支撑。

关键词：叶施，硒肥，谷子，富硒谷子，元素关系

中图分类号：Q945　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：

Response of foxtail millet yield and relationship between elements to foliar application of selenium

XUE Chenyang[1], WANG Chenxi[1,2], ZHANG Yuchen[1,3], ZHANG Si[1], DU Yan[1], LI Xiaojun[1*]

（1. *Key Laboratory of Pollution Ecology and Environmental Engineering*, *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences*, Shenyang, 110016, China; 2. *School of Energy and Environment*, *Inner Mongolia University of Science & Technology*, Baotou, 014000, Neimenggu, China; 3. *School of Municipal and Environmental Engineering*, *Shenyang Jianzhu University*, Shenyang, 110168, China）

Abstract: Selenium (Se) is an essential trace element for humans, and consuming selenium rich

---

基金项目：内蒙古自治区科技创新引导奖励基金项目；黑土地保护与利用科技创新工程专项资助(XDA28090308)；中国博士后科学基金第74批面上项目（2023M743700）。

第一作者：薛晨阳 (1994—)，博士，特别研究助理，主要从事植物元素运输和金属阻控相关研究，（E-mail）472354618@qq.com。

*__通信作者__：李晓军，博士，研究员，主要从事污染土壤生物修复原理与技术、作物对硒的吸收积累原理，（E-mail）lixiaojun@iae.ac.cn。

agricultural products is the best way to effectively supplement the Se needed by the human. In order to facilitate the large-scale production and quality improvement of selenium-rich crops, *Setaria italica* (Zhangzagu-10) was selected as the research object, different concentrations of commercial Se fertilizer on the leaves during the jointing and filling stages were sprayed, Se content and yield of *S. italica* were measured, and the interaction between plant elements was analyzed and elucidated. The results were as follows：(1) Exogenous foliar application of Se fertilizer could significantly increase the Se content in grains and millet yield. (2) Spraying 30.75 g·hm^{-2} (measured as Se) on the leaves once during the grain filling period could increase the Se content of the seeds by 3.7 times compared to the control, meeting the standards for Se rich agricultural products. (3) The ear weight and milling ratio of millet significantly increased by 11.31 % and 17.34 %, respectively. (4) Foliar application of Se significantly altered the element content and interrelationships in plant leaves, stems, leaf sheaths, and grains, with a significant increase in the proportion of positive correlations between elements. (5) Calcium and sulfur ions showed a decreasing trend with the increase of Se fertilizer concentration, while iron, copper, and zinc ions exhibited a low concentration promoting and high concentration inhibiting phenomenon. The decrease in sulfur ion content in leaves and grains might be closely related to the increase in Se content, and the two compete in transportation and metabolic pathways within the plant. In conclusion, the Se fertilizer used in this study can effectively increase the Se content and yield of *S. italica*. During the production process, soil sulfur fertilizer should be appropriately increased to supplement the reduced sulfur element in the grains. The results of this study provide practical support for the improvement of selenium-enriched fertilizer ratio, the production and nutrition regulation of selenium-enriched *S. italica*.

Key words: foliar spraying, selenium fertilizer, millet, selenium-enriched millet, elemental relationship

硒(Selenium，Se)是一种有趣的化学元素，高浓度摄入会产生有害的影响，但是缺硒会严重影响人体正常代谢和健康，例如增加克山病，大骨节病的风险，还会损伤人体的甲状腺功能和免疫系统(White et al., 2016)。因此，在安全浓度下，提高 Se 摄入量对于维持人体健康至关重要。林宏燕等(2022)统计发现 2015 年中国 4-17 岁儿童膳食硒的摄入量平均为 36.8 μg·d^{-1}(林宏燕等，2022)，蔡姝雅等(2024)统计发现 2015 年中国 18 岁及以上成人膳食硒的摄入量平均为 39 μg·d^{-1}(蔡姝雅等, 2024)，而《中国居民膳食营养素参考摄入量(2023)》建议我国成人硒的安全摄入范围为 60~400 μg·d^{-1}。此外，世界卫生组织和美国医学研究所建议人体可接受的 Se 上限摄入量为 400 μg·d^{-1} 成人(World Health Organisation, 1996)。上述研究结果显示我国人群膳食 Se 的摄入远低于建议值，长期 Se 摄入不足可能导致人体出现 Se 缺乏症。

植物是人类获取 Se 的主要来源，生产富 Se 作物是有效提高人体 Se 摄入量的最佳方式，然而我国 70%以上耕地处于不同程度的低 Se 状态(孙国新等，2017)，这在一定程度影响我国人群健康。因此利用外源施加 Se 来提高农产品 Se 含量，生产富 Se 农产品，是提高人群 Se 摄入量的有效手段(Schiavon et al., 2020)。用于富 Se 农产品生产的作物应当满足高产、受众多、消费量大的特点(Miller & Welch, 2013; Schiavon et al., 2020)。谷子(*Setaria italica* var. *germanica*)是我国干旱半干旱地区的重要作物，粮饲兼用，在我国北方广泛种植，被称为“杂粮之首”(Diao，2017；刁现民，2019；董晓杰等，2024)。此外，谷子耐旱、耐酸、耐碱、抗贫瘠，具有良好的病虫害耐受性，在气候变化背景下有助于保障粮食安全，促进经济发展(高贞攀等，2015)。

《中国统计年鉴 2014—2023》数据表明，2013—2022 年我国农业总播种面积为 1.64×10^8 hm^2~1.69×10^8 hm^2，谷子播种面积从 7.08×10^7 hm^2 增加到 8.33×10^7 hm^2，其种植面积广，食用人口多，是农产品富 Se 的首选作物之一。

大量研究证实，外源施硒可以有效提高谷子 Se 含量，刘攀锋等(2022)探究了施硒浓度、施硒时期和施硒方式对谷子产量和 Se 含量的影响，结果显示在抽穗期对晋谷 21 号叶面喷施浓度为 25.41 $g\cdot hm^{-2}$ 的亚硒酸钠是最安全有效的谷子硒强化方案，过高的硒浓度会降低产量和 Se 含量(刘攀锋等，2022)；高嵩等(2023)研究了不同生长期喷施有机硒肥对谷子生长和 Se 含量的影响，相比较对照处理，在灌浆期施加两次可以使谷子穗重有效提高 85%，同时，籽粒中可溶性糖、粗蛋白、可溶性蛋白分别显著提高 7.9%，17.9%，5.2%，籽粒中 Se 含量则显著提高 6 倍(高嵩等，2023)；黄子鹏等(2024)研究了 Na_2SeO_3 和增效剂(腐殖酸,有机硅)协同作用对京古系列谷子的影响，发现腐殖酸对谷子硒含量的提升更为明显(黄子鹏等, 2024)。类似的早期研究在郭美俊等(2014)，高贞攀(2015)中也被探究。此外，外源施硒也可以影响谷子对它化学元素的吸收和富集，兰敏等(2020)发现纳米硒肥可以影响大白谷和张杂谷 13 籽粒中的金属元素，降低籽粒中的汞(Hg)、砷(As)及镉(Cd)含量(兰敏等， 2020)；高嵩等(2023)研究显示外源施硒增加了谷子籽粒中的锌(Zn)和钼(Mo)含量(高嵩等，2023)，但多数研究缺乏对谷子植株其余元素相互作用响应外援施硒的变化，仅仅关注硒含量容易忽视谷子整体的生产品质。

张杂谷-10 号是“张杂系列”品种中具有代表性的品种之一，综合性状表现良好，适应性强，稳产性好，抗病抗倒，熟相好。目前富硒谷子的生产研究仍处于一个发展阶段，相关研究探讨了不同的含硒肥料对谷子硒含量、产品及品质的提升(郭美俊等，2014；高贞攀等，2015；刘攀锋等，2022；高嵩等，2023)。然而，目前大部分研究中所涉及的有机硒肥、纳米硒肥、腐殖酸硒肥等多为自制硒肥(李冉等，2021；高嵩等，2023；边淑惠等，2023；韩芳等，2024)，仅少数研究明确指出富硒肥料的配方和来源(王晓虎等，2023)，而针对商品化富硒肥料研究的缺失容易限制富硒谷子的规模化生产；其次，多数研究过分关注 Se 含量的提升，忽略了外源施硒对作物其余元素的吸收，这不利于生产高品质的富硒谷子(梁克红等，2020；李星星等，2022)。本研究以内蒙古自治区西南部鄂尔多斯市准格尔旗为研究区域，依托张家口市农科院选育的抗除草剂谷子杂交种-张杂谷 10 号和内蒙古朵日钠硒科生物技术科技有限公司提供的富硒营养液，采用叶面喷施的方法，通过比较不同喷硒时期和硒肥浓度对谷子生长发育的影响，拟探讨以下问题：（1）不同时期施加富硒营养液对谷子硒含量和产量的影响；（2）不同富硒营养液浓度对谷子硒含量和产量的影响；（3）叶面喷施富硒营养液对谷子植株元素含量的影响。以期为富硒肥料配比的完善，以及指导富硒作物生产和营养调控提供一定的借鉴意义。

1　材料与方法

1.1　试验材料和场地

本研究采用的实验对象为张家口市农科院选育的抗除草剂谷子杂交种-张杂谷 10 号。研究中施加的硒肥为富硒营养液，由内蒙古朵日钠硒科生物技术科技有限公司提供 [专利证号：CN104829382A]，其主要成分为亚硒酸钠、硫酸亚铁、硫酸锰、硫酸铜、硫酸锌、硫酸镁、壳聚糖季铵盐和烷基多苷(Se 含量 8.2 $g\cdot L^{-1}$，其余成分含量为 10 $g\cdot L^{-1}$)。试验区域位于内蒙古自治区西南部鄂尔多斯市准格尔旗，试验地土壤基本理化性质：有机质含量 8.70 $g\cdot kg^{-1}$、全氮含量 0.54 $g\cdot kg^{-1}$、碱解氮含量 36.33 $mg\cdot kg^{-1}$、有效磷含量 5.45 $mg\cdot kg^{-1}$、速效钾含量 108.60 $mg\cdot kg^{-1}$、硒含量 0.13 $mg\cdot kg^{-1}$。

1.2　试验设计

根据文献和课题组前期研究结果，本研究中设置 3 种硒肥处理方式，4 种硒肥浓度。具体试验设置如下：3 种处理方式分别是拔节期、灌浆期、拔节期＋灌浆期施加硒肥。4 种硒肥浓度(以 Se 记)分别是 30.75 $g·hm^{-2}$ (Se-1)、45.13 $g·hm^{-2}$ (Se-2)、61.50 $g·hm^{-2}$ (Se-3)、78.86 $g·hm^{-2}$ (Se-4)，处理区域分别设置为 CK(施加硒肥同款基液，不含 Se)和施 Se 处理区，每个处理设置 3 个平行重复，共计 42 个处理组，每个处理区域面积为 20 m^2。

叶面喷施选在谷子进入拔节期和灌浆期后的一周内晴朗无风的下午进行，采用无人机对不同处理的谷子进行均匀喷施叶面硒肥，每个时期各进行一次喷施，以 1:30 比例稀释施用。CK 处理组中的谷子不做任何处理，并为避免各小区之间的交叉污染，小区间设置 1 m 宽的隔离保护带，各小区水肥处理和其他农事参照当地管理进行。待籽粒成熟时，每块样地随机抽取 14 株植物，并将植株分为茎、鞘、叶、籽粒 4 个部分。将植物用蒸馏水清洗 3 次后放置于电热鼓风干燥箱 75 ℃烘干至恒重，然后用不锈钢磨样机粉碎，制成粉状样品用封口袋储存，部分样品过 100 目筛，以备后续测定使用。

1.3 谷子产量测定

谷子成熟期收获后，记录测产面积内的穗数和穗总鲜重，计算穗重；随后将籽粒自然风干，统计重量，计算含水率和出米率。

1.4 元素含量测定

1.4.1 常规元素测定

植物常规元素采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定。取 0.2 ~0.5 g 前处理样品，加 10 mL 硝酸:高氯酸(9:1)混合溶液于坩埚中盖盖过夜，次日于电热板上进行消解，温度控制在 130~150 ℃之间，待大量棕色烟消失后，将电热板温度提高到 180 ℃继续消解，直至冒白烟，消化液呈无色透明或略带黄色，冷却后用纯水定容至 25 mL 比色管中，静置一夜。取上清液于 10 mL 离心管中待测。消解过程中以标准物质(GBW10022 蒜粉)和消解液空白作为对照，消解过程与样品一致。

1.4.2 Se 元素测定

参照 GB 5009.93-2017《食品安全国家标准食品中硒的测定》湿法消解法测定样品中的硒含量，植物 Se 元素采用氢化物原子荧光光谱法(原子荧光光谱仪)测定。植物组织前处理同 1.4.1。取 0.2 ~0.5 g 前处理样品，加 10 mL 硝酸:高氯酸(9:1)混合溶液于坩埚中盖盖过夜，次日于电热板上进行消解，温度控制在 130~150 ℃之间，待大量棕色烟消失后，将电热板温度提高到 180℃继续消解，待剩余体积为 1~2 mL 左右切不可蒸干。冷却，加 5 mL 盐酸溶液(6 $mol·L^{-1}$)，继续加热至溶液变为清亮无色并伴有白烟出现。冷却，用纯水定容至 25 mL 比色管中，静置一夜，取上清液于 10 mL 离心管中待测。

1.5 统计分析

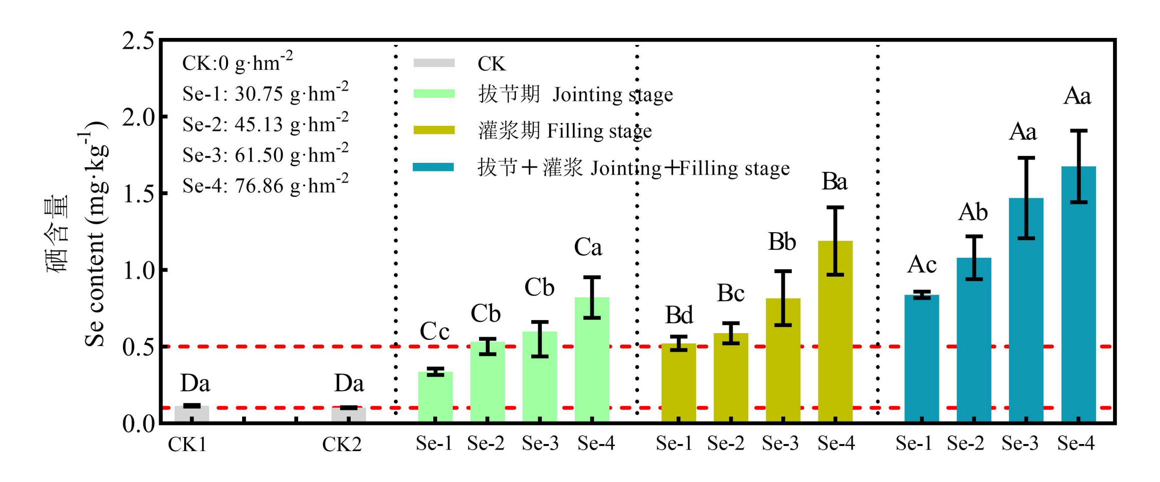
SPSS 22.0 software (version 22.0, IBM, USA)被用来比较不同处理下籽粒硒含量、籽粒含水量、穗重、出米率及叶片、茎秆、叶鞘、籽粒元素含量的差异 (单因素方差分析，One-way analysis of variances, ANOVA, LSD, $P < 0.05$)，所有样本在进行分析前采用 SPSS 22.0 software (version 22.0, IBM, USA)进行异常值的筛除。GraphPad Prism 8 (GraphPad Software, USA) 和 Adobe Photoshop (version 21.0.1, Adobe Systems, USA)被用来绘制图表。相关性分析以叶片、茎秆、叶鞘、籽粒元素含量数据为基础数据，采用 Pearson’s correlation analysis (OmicStudio tools at https://www.omicstudio.cn/tool/62, │Pearson’s correlation│≥0.3, P value < 0.05, Xue et al., 2023)，最后使用 Cytoscape 3.8.0 和 Adobe Photoshop (version 21.0.1, Adobe Systems, USA)绘制相关性图。

2 结果与分析

2.1 外源施硒肥对谷子籽粒 Se 含量的影响

外源施硒可以显著提高谷子籽粒中的硒含量，伴随硒浓度的增加，籽粒中的硒含量均显著增加(图 1，P<0.05)。拔节期施加硒肥的谷子籽粒中 Se 含量从 0.33 $mg·kg^{-1}$ 显著增加到 0.82 $mg·kg^{-1}$ (P<0.05)，相比较对照提高了 2.00~6.40 倍(图 1)；灌浆期施加硒肥的谷子籽粒中 Se 含

量从 0.52 mg·kg^{-1} 显著增加到 1.19 mg·kg^{-1} (P<0.05)，相比较对照提高了 3.70~9.80 倍(图 1)；拔节期和灌浆期施加硒肥的谷子籽粒中 Se 含量从 0.84 mg·kg^{-1} 显著增加到 1.67 mg·kg^{-1} (P< 0.05)，相比较对照提高了 6.60~14.19 倍(图 1)。相比较拔节期，灌浆期施加相同的硒肥可以更加有效的提高籽粒中的硒含量。值得注意的是，拔节期和灌浆期均施加硒肥会显著提高籽粒中的硒含量(P<0.05)，但相比较单一时期施加，籽粒中硒含量并不呈现出成倍的增加，说明外源施硒量并非越高越好；同时，《中华人民共和国供销合作行业标准 GH/T 1135-2017：富硒农产品》中规定，谷类中硒含量范围在 0.1~0.5 mg·kg^{-1}，超出标准值不仅会增加富硒谷子的生产成本，摄入大量 Se 超标的谷子有可能对消费者造成潜在的健康风险。



CK1. 拔节期和灌浆期的对照；**CK2**. 拔节期＋灌浆期的对照。不同小写字母表示同一时期不同浓度 Se 处理间存在显著差异(P < 0.05)；不同大写字母表示不同时期相同浓度 Se 处理间存在显著差异(P< 0.05)。下同。

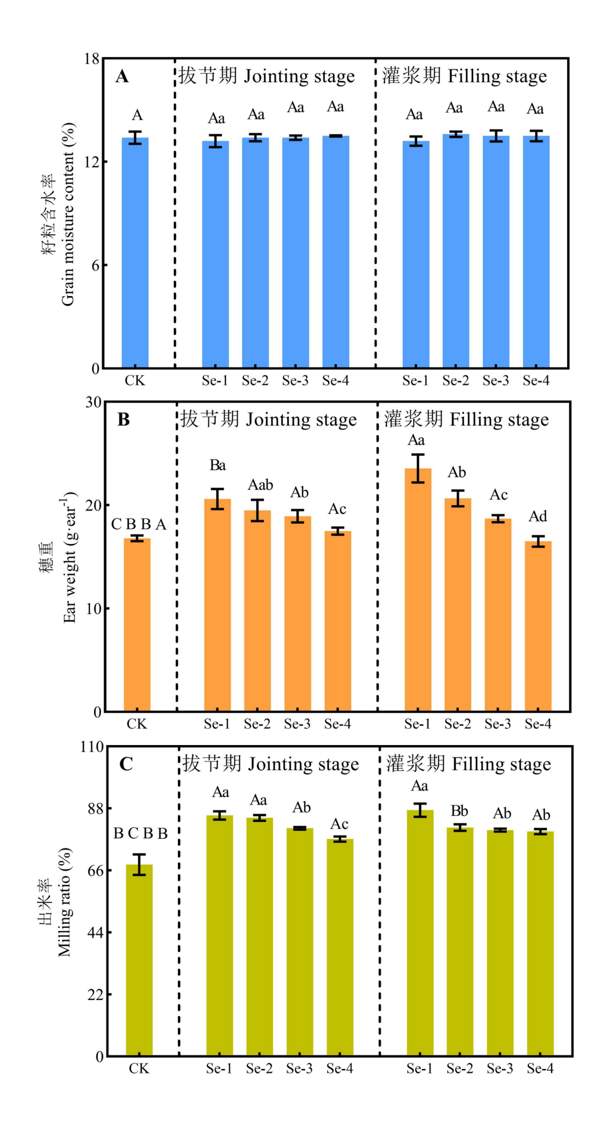
CK1. Control at jointing stage and filling stage；**CK2**. The control at jointing stage + filling stage. Different lowercase letters indicated that there were significant differences between different concentrations of Se treatment in the same period (P < 0.05); Different capital letters indicated that there were significant differences between the same concentration of Se treatment in different periods (P < 0.05). The same below.

图 1 不同浓度硒肥处理对谷子籽粒硒含量的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of selenium fertilizer on Se content in grains of *Setaria italica*

2.2 外源施硒肥对谷子产量的影响

考虑到成本和风险性问题，本部分重点考虑单一时期施肥对谷子产量的影响。数据结果显示，拔节期和灌浆期外源施加硒肥并不会显著影响谷子籽粒的含水量，并且不同浓度硒肥处理间不存在显著性差异(图 2：A，P>0.05)。拔节期和灌浆期外源施硒肥(Se-1、Se-2、Se-3)可以显著提高谷子的穗重(图 2：B，P<0.05)，相比较对照，拔节期谷子穗重增加了 12.68%~22.69%，灌浆期则增加了 11.31%~40.26%；灌浆期仅在 Se-1 处理下显著高于拔节期(图 2：B，P<0.05)。有趣的是，不论施硒时期，谷子穗重均随着施硒量的增加而显著降低(图 2：B，P<0.05)，这说明施硒量并非越高越好，过量的硒肥有可能影响植株的正常生长，进而降低谷子产量。与穗重结果相似，外源施硒肥显著提高了谷子的出米率(图 2：C，P<0.05)，拔节期谷子出米率增加了 13.44%~25.78%，灌浆期则增加了 17.34%~28.5%；灌浆期仅在 Se-2 处理下显著高于拔节期(图 2：C，P<0.05)。结合籽粒硒含量(图 1)、穗重及出米率(图 2)，在谷子生长发育的灌浆期，按照 30.75g·hm^{-2} 标准施加硒肥不仅可以有效的节约成本，还可以大幅度提高产量。



A. 籽粒含水率；**B**. 穗重；**C**. 出米率。CK 分别与其余四种处理比较，所以标注 4 个大写字母。

B. **A**. Gain moisture content; **B**. Ear weight; **C**. Milling ratio. CK is compared with the other four treatments, so four capital letters were marked.

图 2 不同浓度硒肥处理对谷子产量的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of selenium fertilizer on yield o *Setaria italica*

2.3 外源施硒肥对植株中元素含量的影响

基于硒含量和产量数据，本部分以灌浆期谷子为研究对象，深入探究了外源施硒肥对植株中元素含量的影响，包括常规元素钾（K）、钙（Ca）、镁（Mg）、铁（Fe）、铜（Cu）、锌（Zn）、硫（S）、磷（P）和微量元素 Se、钼（Mo）（图 3）。数据显示，植株叶片元素含量整体上表现出两种变化模式，随着硒肥浓度的增加，K、Ca、Mg、Mo、S 呈现出下降趋势，Fe、Cu、Zn、Se、P 在 Se-1 到 Se-3 处理下呈现出增加趋势，随后在 Se-4 处理下降低(图 3)。相比较对照处理，Se-4 处理下 K 离子降幅最大为 22.30%，Se-3 处理下 Ca 离子降幅最大为 28.01%，Se-2 处理下 Mg 离子降幅最大为 28.98%，Se-4 处理下 Mo 离子降幅最大为 52.29%，Se-3 处理下 S 离子降幅最大为 18.01%；Se-2 处理下 Fe 离子增幅最大为 227.57%，Se-3 处理下 Cu 离子增幅最大为 114.95%，Se-2 处理下 Zn 离子增幅最大为 192.65%，Se-3 处理下 Se 离子增幅最大为 1 419%，Se-1 处理下 P 离子增幅最大为 15.88%(图 3)。与图 2 穗重和出米率结果相似，Se-4 处理下的植株元素含量往往较低，说明高浓度的硒肥有可能对植株生长发育造成不良影响。

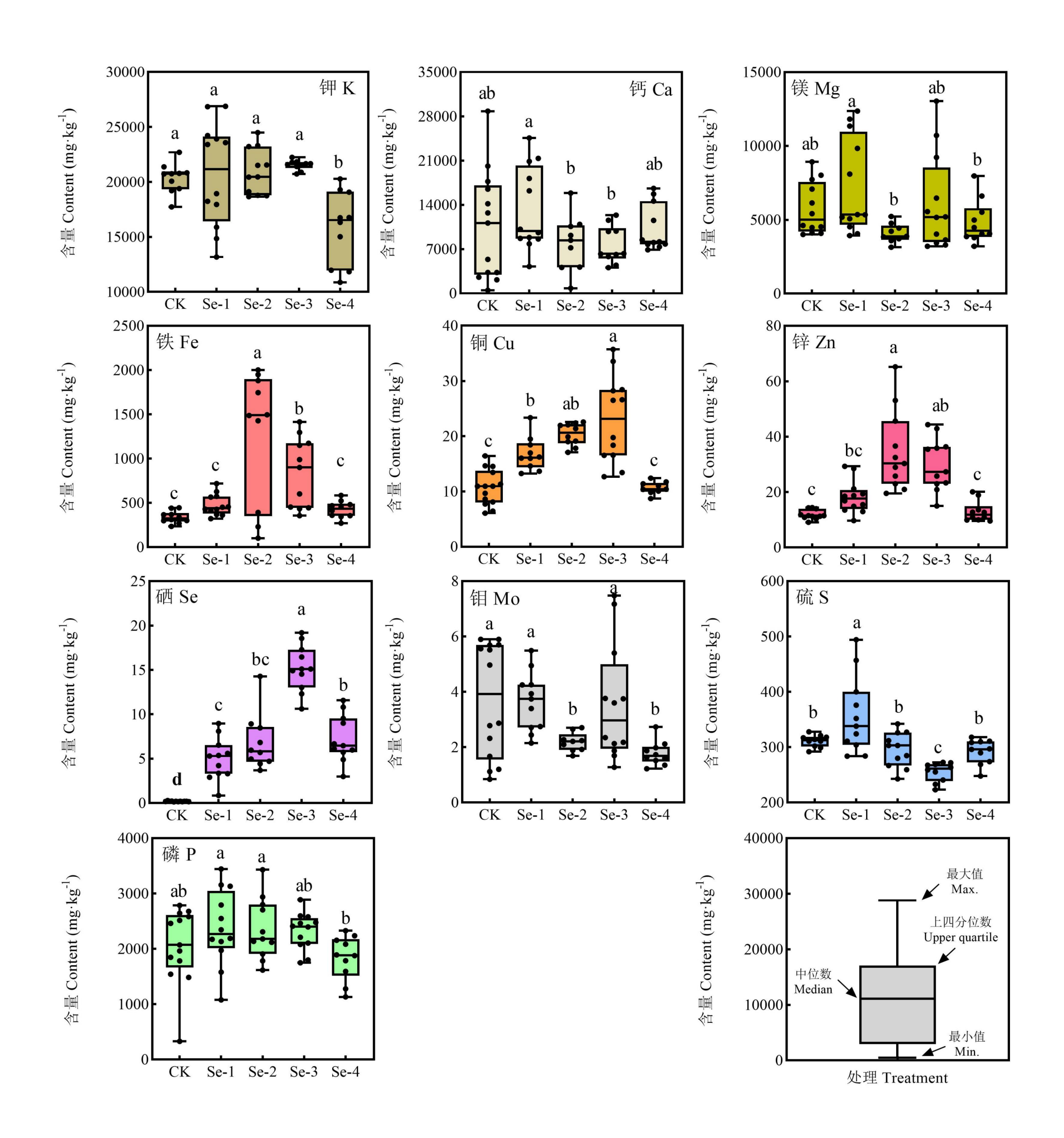


图 3 灌浆期不同浓度硒肥处理对谷子叶片元素含量的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of selenium fertilizer on element content in leaves during grain filling stage of *Setaria italica*

相比较叶片数据，茎秆多数元素呈现上升趋势，随着硒肥浓度的增加，仅有 Ca 和 Mo 呈现出下降趋势，而 K，Mg，Fe，Cu，Zn，Se，S 在 Se-1 到 Se-3 处理下均呈现出增加趋势，随后在 Se-4 处理下降低(图 4)。相比较对照处理，Se-3 处理下 Ca 离子降幅最大为 51.99%，Se-3 处理下 Mo 离子降幅最大为 78.29%；Se-2 处理下 K 离子增幅最大为 23.21%，Se-3 处理下 Mg 离子增幅最大为 40.08%，Se-3 处理下 Fe 离子增幅最大为 270.71%，Se-2 处理下 Cu 离子增幅最大为 476.05%，Se-3 处理下 Zn 离子增幅最大为 449.65%，Se-3 处理下 Se 离子增幅最大为 10 028%，Se-2 处理下 S 离子增幅最大为 29.24% (图 3)。外源硒肥处理在一定程度上增强了植株的生长发育，而 Se-4 处理下的植株元素含量的下降趋势说明高浓度的硒肥对植株生长发育会造成一定的不良影响。

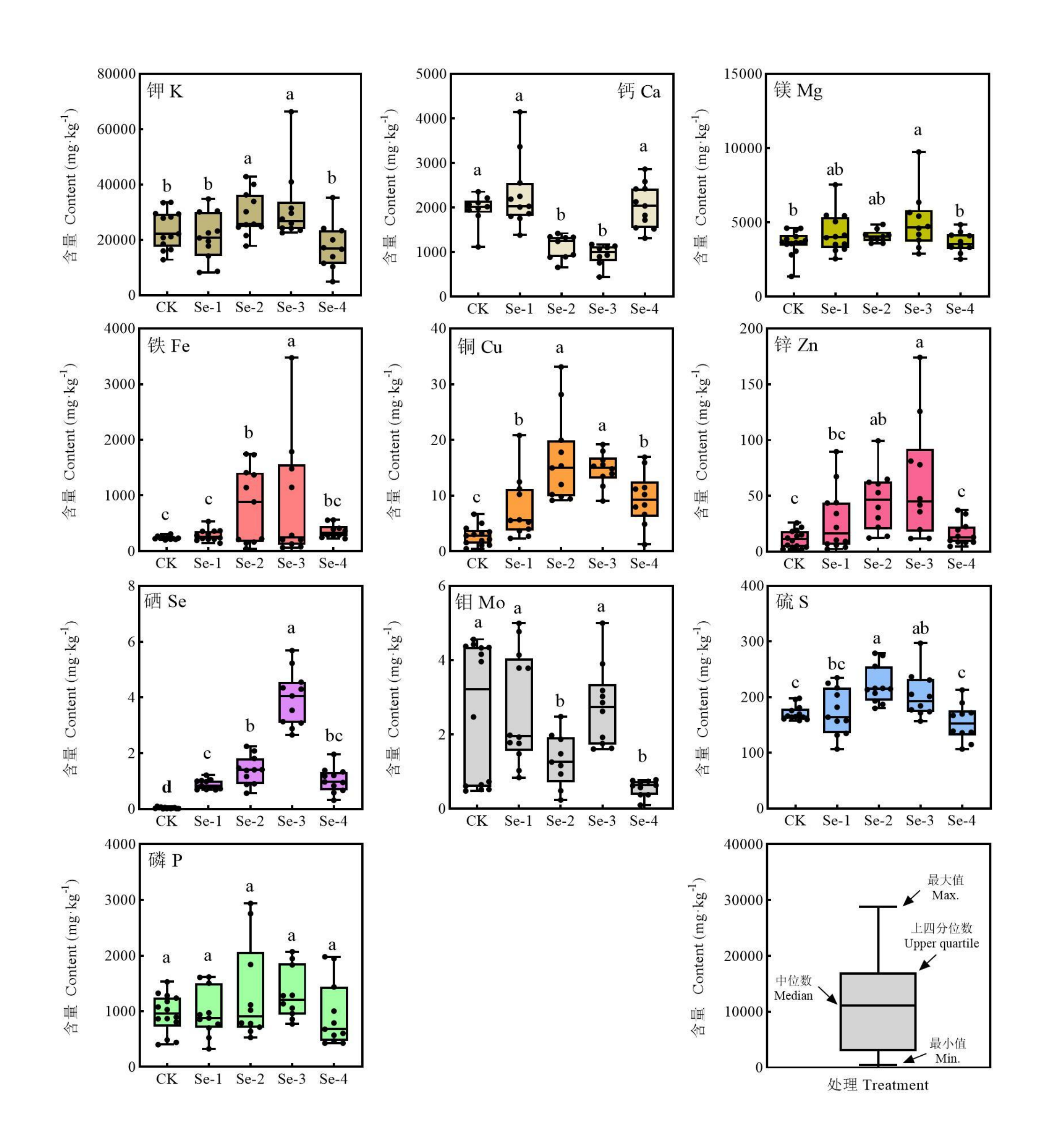


图 4 灌浆期不同浓度硒肥处理对谷子茎秆元素含量的影响

Fig. 4 Effects of different concentrations of selenium fertilizer on element content in steam during grain filling stage of *Setaria italica*

随着硒肥浓度的增加，叶鞘仅有 Mo，S，P 呈现出下降趋势，而 Fe，Cu，Zn，Se 则与叶片和茎秆变化趋势一致，在 Se-1 到 Se-3 处理下呈现出增加趋势，随后在 Se-4 处理下降低(图 5)。相比较对照处理，Se-3 处理下 Mo 离子降幅最大为 65.71%，Se-4 处理下 S 离子降幅最大为 32.56%；Se-4 处理下 P 离子降幅最大为 44.16%；Se-2 处理下 Fe 离子增幅最大为 149.08%，Se-3 处理下 Cu 离子增幅最大为 277.78%，Se-2 处理下 Zn 离子增幅最大为 223.71%，Se-3 处理下 Se 离子增幅最大为 2700% (图 5)。叶鞘是叶柄或叶片基部包裹茎的部分，相比较叶片和茎秆，其元素种类受硒肥影响较小。

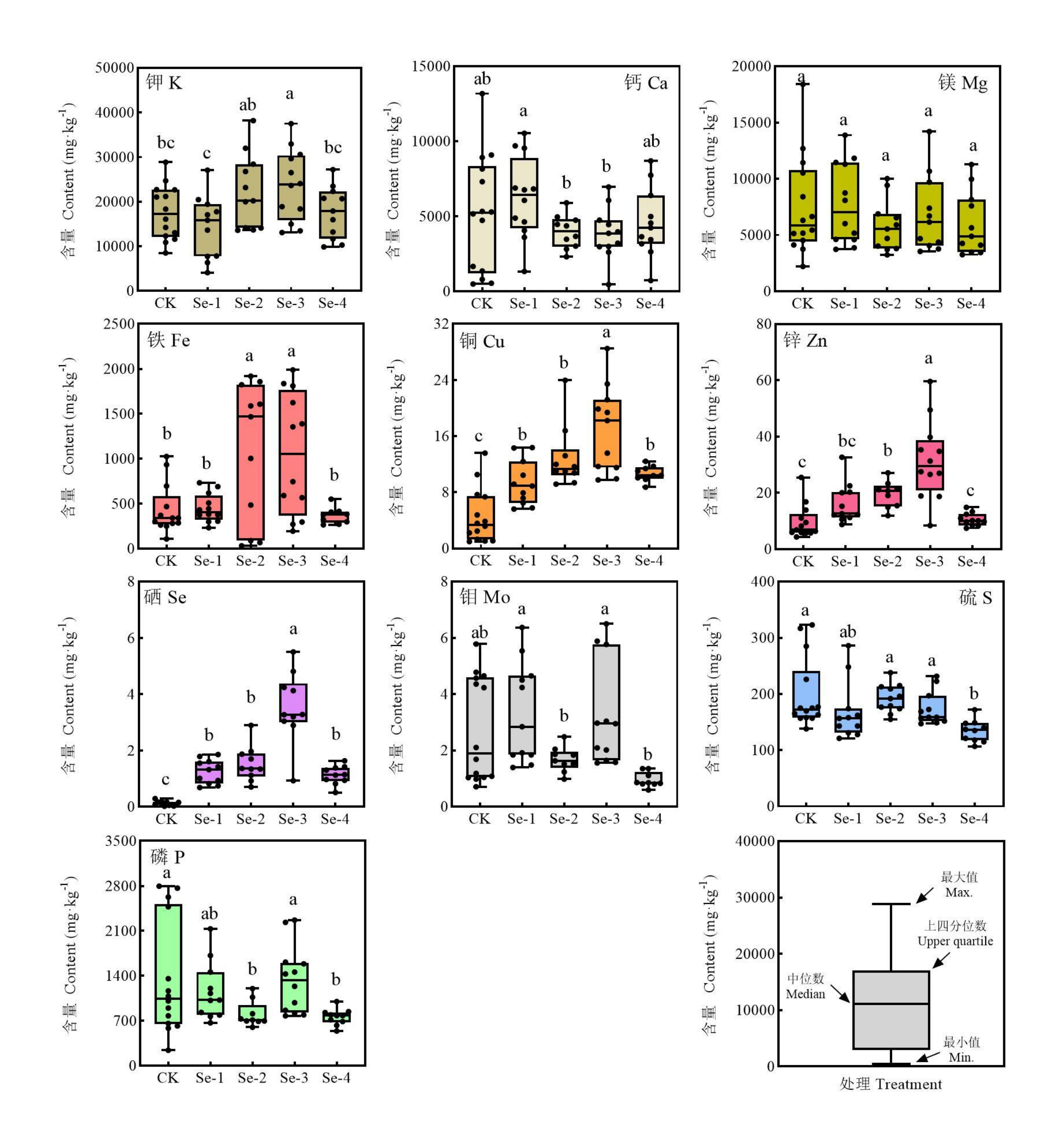


图 5 灌浆期不同浓度硒肥处理对谷子叶鞘元素含量的影响

Fig. 5 Effects of different concentrations of selenium fertilizer on element content in leaf sheath during grain filling stage of *Setaria italica*

外源施加硒肥除了显著影响籽粒 Se 含量外(图 1)，其余元素含量也发生显著的变化。随着硒肥浓度的增加，籽粒元素种类和含量的变化与叶片相似，其中 Ca，Mg，S 呈现出下降趋势，Cu，Zn，Mo 则在 Se-1 到 Se-2 处理下呈现出增加趋势，随后逐渐降低(图 6)。相比较对照处理，Se-4 处理下 Ca 离子降幅最大为 46.35%，Se-3 处理下 Mg 离子降幅最大为 10.86%，Se-4 处理下 S 离子降幅最大为 28.84%；Se-2 处理下 Cu 离子增幅最大为 90.59%，Se-3 处理下 Zn 离子增幅最大为 97.06%，Se-2 处理下 Mo 离子增幅最大为 303.22% (图 6)。与植株叶片、茎秆及叶鞘 Se 含量变化不同，籽粒中的 Se 含量随着硒肥浓度的增加而增加(图 1)，这或许暗示我们外源施硒肥可能会导致一部分硒附着在籽粒表面，并非借助叶片吸收转运。

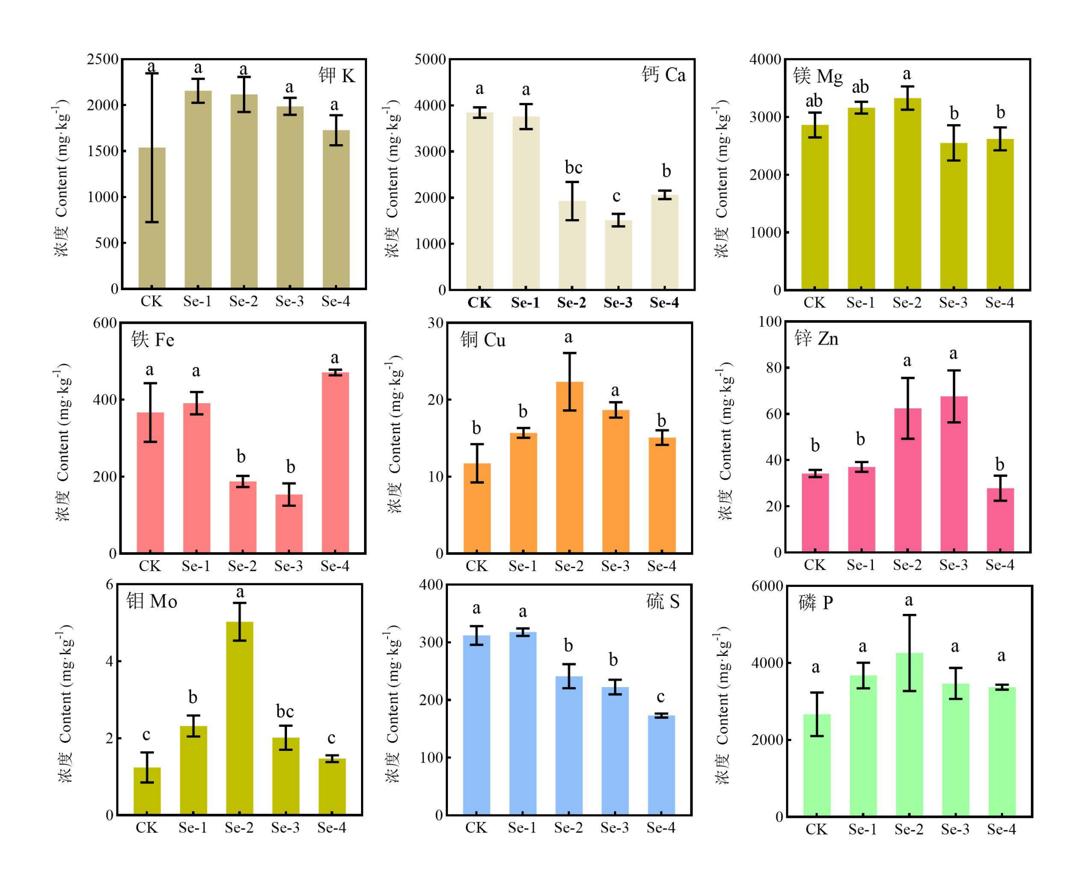
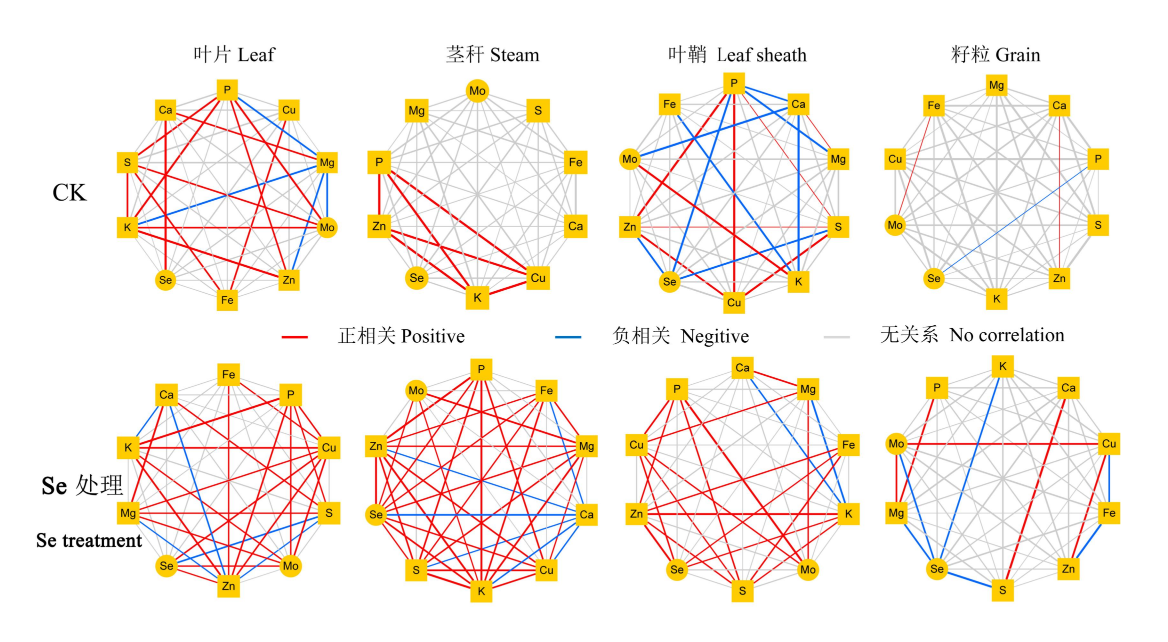


图 6 灌浆期不同浓度硒处理对谷子籽粒元素含量的影响

Fig. 6 Effects of different concentrations of selenium fertilizer on element content in grains during grain filling stage of *Setaria italica*

2.4 谷子植株各部位的元素含量关系

数据显示，植株不同部位元素间的相互作用存在显著的差异，外源施硒肥会改变元素间的相互作用关系(图 7)。正常生长状态下，谷子叶片和叶鞘的元素关系比茎秆和籽粒更为复杂，同时，常规元素间的相互作用关系数量要高于微量元素，叶片中 Se 和 Mo 元素分别仅有 1 和 4 条关系，而 P，S，K，Mg 元素平均 4 条以上，茎秆中微量元素与其余元素间没有明显相互作用关系(图 7)。外源施加硒肥后，植株元素间的相互作用关系变的更为紧密，叶片、茎秆、叶鞘及籽粒中元素间的相互作用关系占比从 35.56%，13.33%，35.56%，6.67%增加到 55.56%，75.56%，44.44%，24.44%；相比较负相关关系，外源施硒肥显著增加了元素间的正相关关系，叶片、茎秆、叶鞘及籽粒中正相关关系比例分别从 26.67%，13.33%，17.78%，4.44%增加到 44.44%，62.22%，40%，11.11%。叶片和籽粒中 Se 与 S 元素呈显著的负相关关系(图 7，$P < 0.05$)，籽粒中 Se 与 Mg，K 及 Mo 元素均呈现出显著的负相关关系，而茎秆和叶鞘中，Se 与大量的常规元素呈现出显著的正相关关系(图 7，$P < 0.05$)，这说明外源施加硒肥可能对植物生长发育和植株体内元素运输积累产生不同的作用。



红色代表元素间存在正相关关系($P < 0.05$)，蓝色代表元素间存在负相关关系($P < 0.05$)，灰色代表无显著性关系($P > 0.05$)。

Red represents a positive correlation between elements ($P < 0.05$), blue represents a negative correlation between elements ($P < 0.05$), and gray represents no significant relationship ($P > 0.05$).

图 7 硒肥处理对谷子植株的元素响应关系的影响

Fig. 7 Effects of selenium fertilizer treatment on the element response relationship of *Setaria italica* plants

3 讨论与结论

3.1 外源施硒肥对谷子硒含量和产量的影响

富硒作物的农艺强化措施主要有两种形式：土壤施硒和叶面施硒，前者效果受土壤性质影响较大，大部分硒因吸附或形态变化而被持留在土壤中，降低了农作物对硒的利用度，增加了富硒作物的生产成本，而后者不需要经历植物根系吸收和转运这一过程，少量施加即可达到显著的富硒效果(White et al., 2018; Raina et al., 2021)。本研究中，最低的 Se-1 处理(30.75 g·hm^{-2})都可以显著提高籽粒中的 Se 含量，达到对照处理的 3.00~5.00 倍，同时满足我国 GH/T 1135-2017《富硒农产品》对富硒谷物中 Se 含量的规定。连续在拔节期和灌浆期施加硒肥确实要高于单一时期施加硒肥，但是籽粒中的硒含量并没有像施加浓度一样翻倍，同时籽粒中 Se 含量要明显高于食品标准中的范围，说明增加施 Se 量在成本收益上并不划算，同时大量摄入超标的谷物可能对人体产生潜在的健康风险。综合比较 3 种施硒方式，在灌浆期施加硒肥对籽粒中 Se 含量的提升效果最好。高嵩等(2023)研究结果也显示在灌浆期喷施硒肥对谷子 Se 含量的提升最为明显。此外，针对小麦(聂浩亮等，2023)、水稻(余侃等，2023)及玉米(楚文聪等，2024)的研究结果也显示在灌浆期施加叶面硒肥对籽粒硒含量提升效果较好，可达到富硒标准及满足人体所需。本研究结果证实，采用内蒙古朵日钠硒科生物技术科技有限公司提供的含硒营养液可以有效提高谷子籽粒中的硒含量，该富硒营养液适合内蒙古地区富硒谷子的规模化生产。Wang 等(2024)研究中也采用了配方明确的含硒肥料，其以中国苏州硒谷科技有限公司提供的的富硒肥料(SETEK-19BF-001)为研究对象，发现硒肥施加量为 100.65~120.15 kg·hm^{-2} 可以有效提高谷子硒含量，适合山西晋中富硒谷子的生产(Wang et al., 2024)。因此，富硒谷子的规模化生产需确保采用成分明确、工艺完善的商品化硒肥，这样有助与保证富硒效果和成本控制。

多数研究证实，外源施加硒对植物的生长发育存在一个低浓度促进，高浓度抑制的现象(孙星等，2023)。Tao 等(2023)以荞麦为研究对象，发现按照 5 g·hm^{-2} 施加硒肥可以显著促进荞麦(*Fagopyrum esculentum*)的生长和产量，但是按照 20 g·hm^{-2} 浓度进行施加结果反而弱于 5

$g\cdot hm^{-2}$，说明施加高浓度硒会降低荞麦的产量增加趋势(Tao et al., 2023)；Cipriano 等(2023)研究了外源施硒对高粱(*Sorghum bicolor*)生长发育的影响，发现每株植物施加 0.125 mg Na_2SeO_4 可以最有效的提高籽粒的硒含量，而当每株施加 0.5 mg Na_2SeO_4 时，会显著增加植物叶片的氧化应激反应，导致丙二醛含量和抗氧化酶活性显著升高(Cipriano et al., 2023)；王文霞等(2024)发现外源施硒可以显著改善胡麻(*Linum usitatissimum* L.)的产量和品质，但是当施硒量超过 50 $g\cdot hm^{-2}$ Na_2SeO_3 时，胡麻的产量和品质出现下降趋势，这说明外源硒浓度并非越高好(王文霞等，2024)。本研究中，相比较对照处理，外源施加硒肥增加了谷子的产量，拔节期和灌浆期外源施硒肥(Se-1、Se-2、Se-3)可以显著提高谷子的穗重，然而谷子穗重均随着施硒量(Se-4)的增加而显著降低，这与前人的研究结果相一致。本课题组前期研究结果显示，一次性喷施过高浓度的硒肥溶液，容易损伤植株叶片，影响植物的正常生长发育(Li et al., 2021)。而相关研究证实，外源施加肥料可以通过提高叶片的光合作用和抗氧化能力来提高植株的生长发育(李星星等，2022)。吕海祥等(2015)研究发现外源施加硒(0~1.5 $mg\cdot kg^{-1}$)可以显著增强罗布麻(*Apocynum venetum*)幼苗叶片的叶绿素荧光参数和含量(吕海祥等，2015)；史丽娟等(2020)发现外源施加 Na_2SeO_3 可以提高高粱叶片叶绿素含量、净光合速率和气孔导度呈先升高后降低的趋势。因此，高浓度的硒肥可能对叶片造成一定的损伤，进而导致光合作用速率降低，产量降低。综上所述，本研究结果显示，在谷子生长发育的灌浆期按照 30.75$g\cdot hm^2$ 标准施加硒肥是提高谷子硒含量和产量的有效手段。

3.2 外源施硒肥对谷子元素相互关系的影响

富硒谷子生产过程中，首先需要明确的是，均衡的养分供应和吸收是确保植物正常生长的先决条件，此外，在植物生长发育到产出的过程中，养分元素间的相互配比对于生产成本控制和植物的生长至关重要(Fageria et al., 2008)。从人体需求和经济成本角度出发，外源施加硒肥在增加作物 Se 含量和产量的基础上，如果能过提高植物或者人体所需的其余营养元素，将有助于完善硒肥配比、降低生产成本及增加产品品质(Gaj et al., 2020)。本研究中，根、茎、叶及籽粒中 10 种元素含量结果显示，外源施硒对其余 9 种元素含量的影响受到施硒浓度的显著影响，整体上表现出两种模式，一种随着 Se 浓度的增加呈现下降趋势，一种则在低浓度处理增加，在高浓度处理下降低，呈现出低促高抑现象。大量研究已经证实，外源叶面施加硒肥可以显著改变植物的元素富集特征，白旭琴等(2024)研究结果显示，外源叶施硒肥可以显著降低紫花苜蓿中的 Cd 含量，试验组植株对 Cd 的转运和富集能力显著降低(白旭琴等，2024)；王梦园等(2024)研究了叶面施加硒肥对水稻籽粒中不同矿质元素的影响，结果显示高浓度硒处理(60 $g\cdot hm^{-2}$)降低了 N、Mn、Cu、Hg、铅(Pb)、Cd、铬(Cr)的含量，但提高了 Zn、Ca、Mg、K、P 元素的含量。本研究中，外源施加硒肥增强了元素间的相互作用关系，元素间的正相关比例显著增加，这印证了外源施加硒肥可以促进植物的生长发育，与植物产量和硒含量结果相一致。本研究中谷子植株中 K 和 Fe 元素呈现出低浓度促进，高浓度抑制的现象，相似结果在 Liang 等(2020)研究中也出现。Liang 等(2020)研究发现叶面喷施不同浓度的 Na_2SeO_3，谷子中 K 元素在 0~60 $g\cdot hm^{-2}$ 范围内呈现上升趋势，在 60~120 $g\cdot hm^{-2}$ 范围则开始下降，Fe 元素在 0~30 $g\cdot hm^{-2}$ 范围内呈现上升趋势，在 30-120 $g\cdot hm^{-2}$ 范围则开始下降(Liang et al., 2020)。矿物元素对以 Na_2SeO_3 为主的硒肥可能发生协同作用或拮抗作用，具体情况取决于矿物类型、植株基因型和硒用量(Sun et al., 2017)。植物细胞膜中的氧化还原现象可以影响矿物元素含量(Narváez-Ortiz et al., 2018)，这体现在细胞运输和代谢过程中(Iqbal et al., 2015)。相比较叶片、茎秆和叶鞘，本研究中籽粒 Fe 含量变化趋势缺少明显的规律，这可能受到取样误差的影响，需要进行更为精确的试验来进行验证。然而，外源施硒也不总是影响作物元素间的吸收和转运，楚文聪等(2024)以玉米为研究对象，进行了为期两年的田间施硒试验，结果显示叶面喷施 Na_2SeO_3 溶液可以提高玉米籽粒中硒含量，但是不会提高玉米产量，且玉米籽粒中 Fe、Mn、Cu、Zn 这 4 种矿质元素含量无显著性变化。相似的研究现象在水稻(王金英等，2006)和小麦(刘庆等，2016)中也有出现，这说明植物体内元素间的相互作用关系复杂，需要针对特定的场景进行讨论(聂浩亮等，2023)。

本研究中，相比较对照处理，谷子叶片、茎秆及叶鞘中的 Ca、S 及 P 均呈现出较大程度

的下降，籽粒中的 Ca 和 S 也表现出相似的规律。Da Silva 等(2020)研究发现向苜蓿叶面喷施 Na_2SeO_3 可以降低叶面中的 Ca 和 S 含量，作者认为 S 含量的降低是因为其与 Se 存在竞争关系，而 Ca 离子需要维持质膜的完整性，其降低可能与 S 含量有关(Da Silva et al., 2020)；Cipriano 等(2023)研究显示向高粱叶面喷施 Na_2SeO_4 可以降低叶片和籽粒中的 Ca 含量(Cipriano et al., 2023)。硫(S)是植物体必需的大量营养元素，其存在于维持细胞活力的各个主要细胞成分中，例如膜脂和细胞壁中，除了 S-氨基酸，半胱氨酸和蛋氨酸外，S 还存在于维生素和硫胺素，生物素和辅酶 A 等辅助因子中(Takahashi et al., 2011)。Se 的化学性质类似于 S，目前研究认为硒酸盐在植物体内的运输借助硫转运蛋白，根系中吸收的硒酸盐可能通过硫酸盐转运蛋白(SULTR2;1 和 SULTR2;2)转运到根木质部和韧皮部系统中，并借助 SULTR1;1 和 SULTR1;2 转运蛋白进入叶肉细胞。进入叶肉细胞的 SeO_4^{2-}首先被被 ATP 硫酸酶(ATPS)激活形成 APSe，随后被 APS 还原酶(APR)转化为 SeO_3^{2-}，SeO_3^{2-}在亚硫酸还原酶(SiR)作用下被还原为 Se^{2-}(或借助谷胱甘肽还原酶 GR)，Se^{2-}与 O-乙酰丝氨酸(OAS)在 OAS 裂解酶(OAS-TL)催化下形成 SeCys，SeCys 可以转化为 Se、甲基化 SeCys(Me-SeCys)、硒代蛋氨酸(SeMet)，硒酸盐同化过程中所涉及到的酶均为植物硫代谢途径中的酶，植物体内硒酸盐主要借助硫代谢途径进行转化，这说明 Se 在植物体内的同化和代谢与硫代谢密切相关(Li et al., 2008; Hsu et al., 2011; Schiavon & Pilon Smits, 2017；Raina et al., 2021)。本研究中，随着叶面施加硒肥浓度增加，多数元素均呈现出显著增加趋势，元素间的相互作用关系仍以正相关为主，说明外源施加硒肥有助于促进植物整体元素含量的提升。植株 S 元素的下降可能是进入叶面的 SeO_3^{2-}参与到硫代谢途径，与硫酸盐存在明显的竞争关系，这就导致叶片和籽粒中的 S 元素含量显著降低。Wang 等(2024)研究证实叶面喷施硒肥可以显著改变植株叶片的基因表达水平，Se 处理后编码硫酸盐转运蛋白和抗氧化酶的的基因转录水平显著上调(Wang et al., 2024)。S 元素是组成蛋白质的必须元素，S 元素降低可能导致籽粒中蛋白质含量的降低，进而影响到谷子的品质，因此在后续研究富硒谷子生产时，应考虑土施硫肥的可能性，在提升作物硒含量时，不仅需要考虑叶面施肥，还需要结合土施肥料，这样才能更高效的生产优质的富硒作物。

参考文献

BAI XQ, JIA CY, LI WS, et al., 2024. An investigation of foliar spraying of selenium fertilizer for selenium enrichment and cadmium reduction in alfalfa [J]. Acta Prataculturae Sinica, 33(1): 50-60. [白旭琴，贾春云，李文栓，等，2024. 叶面喷施硒肥对紫花苜蓿富硒降镉效果的影响 [J]. 草业学报，33(1)：50-60.]

BIAN SH, XING GF, LIANG X, et al., 2023. Effects of different forms selenium and dosage on foxtail millet growth and physiology at seedling stage [J]. Crops, 212(1): 152-157. [边淑惠，邢国芳，梁昕，等，2023. 不同形态硒及用量对幼苗期谷子生长与生理的影响 [J]. 作物杂志，212(1)：152-157.]

CAI SY, TANG ZX, ZHAO LY, et al., 2024. Dietary selenium intake status of adults aged 18 and above in China from 2015 to 2017 [J]. Food and Nutrition in China: 1-6. [蔡姝雅，唐增煦，赵丽云，等，2024. 2015-2017 年中国 18 岁及以上成人膳食硒的摄入状况 [J]. 中国食物与营养: 1-6.]

CHU WC, CAI WT, XIA DF, et al., 2024. Effect of foliar spraying of selenium fertilizer on contents of selenium and other mineral elements in corn grains [J]. Modern Agricultural Science and Technology, (1): 1-7. [楚文聪，蔡万涛，夏杜菲，等，2024. 叶面喷施硒肥对玉米籽粒硒及其他矿质元素含量的影响 [J]. 现代农业科技，(1)：1-7.]

CIPRIANO PE, DA SILVA RF, MARTINS FAD, et al., 2023. Selenate fertilization of sorghum via

foliar application and its effect on nutrient content and antioxidant metabolism [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 115: 104865.

DA SILVA DF, CIPRIANO PE, DE SOUZA RR, et al., 2020. Biofortification with selenium and implications in the absorption of macronutrients in *Raphanus sativus* L [J]. Journal of food composition and analysis, 86: 103382.

DIAO X, 2017. Production and genetic improvement of minor cereals in China [J]. The Crop Journal, 5(2): 103-114.

DIAO XM, 2019. Progresses in stress tolerance and field cultivation studies of orphan cereals in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 52(22): 3943-3949. [刁现民，2019. 禾谷类杂粮作物耐逆和栽培技术研究新进展 [J]. 中国农业科学，52(22)：3943-3949.]

DONG XJ, LI ZJ, MA JF, et al., 2024. Current situation analysis of millet breeding varieties from the spring-sowing region in northeast China in 2011-2021 [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 42(1): 57-65. [董晓杰，李志江，马金丰，等，2024. 2011-2021 年东北春谷区谷子选育品种现状分析 [J]. 四川农业大学学报，42(1)：57-65.]

FAGERIA NK, BALIGAR VC, LI YC, 2008. The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty first century [J]. Journal of plant nutrition, 31(6): 1121-1157.

GAJ R, GÓRSKI D, MAJCHRZAK L, 2020. The effect of potassium and micronutrient foliar fertilisation on the content and accumulation of microelements, Yield and Quality Parameters of Potato Tubers [J]. Agriculture, 10(11): 530.

GAO S, LI YC, ZHAO D, et al., 2023. Effects of foliar spraying organic selenium on millet growth and selenium content [J]. Horticulture & Seed, 43(1): 89-91. [高嵩，李瑞春，赵丹，等，2023. 叶面喷施有机硒肥对谷子生长和硒含量的影响 [J]. 园艺与种苗，43(1)：89-91.]

GAO ZP, GUO PY, YUAN XY, et al., 2015. Effects of foliar spraying Na_2SeO_3 during the grain filling stage on quality and seeds selenium content of foxtail millet [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 35(2):157-161. [高贞攀，郭平毅，原向阳，等，2015. 叶面喷施亚硒酸钠对谷子籽粒含硒量及品质的影响 [J]. 山西农业大学学报（自然科学版），35(2)：157-161.]

GUO MJ, GUO PY, YUAN XY, et al., 2014. Effect of foliar spraying Na_2SeO_3 on the agronomic traits of foxtail millet hybrid Zhangzagu 10 [J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 34(1): 5-9. [郭美俊，郭平毅，原向阳，等，2014. 叶面喷施亚硒酸钠对张杂谷 10 号农艺性状的影响 [J]. 山西农业大学学报（自然科学版），34(1)：5-9.]

HAN F, HAN XD, SU LP, et al., 2024. Effects of foliar spraying nano-selenium on agronomic traits and selenium content of different genotypes of foxtail millet [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 52(12): 89-95. [韩芳，韩向东，苏乐平，等，2024. 叶面喷施纳米硒对不同基因型谷子农艺性状、硒含量及产量和品质的影响 [J]. 江苏农业科学，52 (12)：89-95.]

HUANG ZP, WEI D, CHI FQ, et al., 2024. Selenium enrichment ability of different millet varieties and synergistic effects of exogenous selenium synergist [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, (4): 206-213. [黄子鹏，魏丹，迟凤琴，等，2024. 不同谷子品种富硒能力及外源硒协同增效作用的研究 [J]. 中国土壤与肥料，(4)：206-213.]

HSU FUC, WIRTZ M, HEPPEL SC, et al., 2011. Generation of Se-fortified broccoli as functional food: impact of Se fertilization on S metabolism [J]. Plant, Cell & Environment, 34(2): 192-207.

IQBAL M, HUSSAIN I, LIAQAT H, et al., 2015. Exogenously applied selenium reduces oxidative stress and induces heat tolerance in spring wheat [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 94: 95-103.

LAN M, YIN MQ, WEN YY, et al., 2020. Effect of nano-selenium on the biomass and trace elements content of millet [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 48(4): 515-519. [兰敏，尹美强，温银元，等，2020. 纳米硒对谷子生物量和微量元素含量的影响 [J]. 山西农业科学，48(4)：515-519.]

LI HF, MCGRATH SP, ZHAO FJ, 2008. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite [J]. New phytologist, 178(1): 92-102.

LI X, SUN J, LI W, et al., 2022. Effect of foliar application of the selenium-rich nutrient solution on the selenium accumulation in grains of Foxtail millet (Zhangzagu 10) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 29(4): 5569-5576.

LI XX, HAN F, ZHOU X, et al., 2022. Research progress of selenium-enriched millet [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 38(7): 1-6. [李星星，韩芳，周雪，等，2022. 富硒谷子研究进展 [J]. 中国农学通报，38(7)：1-6.]

LI R, LIU UH, LIANG S, et al., 2021. Influences of selenium fertilizer on millet yield and grain selenium enrichment [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 23(6): 140-146. [李冉，刘宇航，梁杉，等，2021. 硒肥对谷子产量因子及其籽粒富硒效果的影响 [J]. 中国农业科技导报，23 (6)：140-146.]

LIANG KH, LU LG, ZHU DZ, et al., 2020. Research progress of selenium content and selenium enrichment in millet of China [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 20(7): 337-343. [梁克红，卢林纲，朱大洲，等，2020. 我国小米硒含量情况及富硒化研究进展 [J]. 中国食品学报，20 (7): 337-343.]

LIANG KH, LIANG S, ZHU H, 2020. Comparative proteomics analysis of the effect of selenium treatment on the quality of foxtail millet [J]. LWT-Food Science and Technology, 131: 109691.

LIN HY, XING S, ZHOU F, et al., 2022. Dietary selenium intake levels and trends among children and adolescents aged 4-17 in nine provinces (regions) of China [J]. Research on trace elements and health, 39(3): 48-50. [林宏燕，邢曙，周福，等，2022. 我国九省(区)4～17 岁儿童青少年膳食硒摄入水平及变化趋势 [J]. 微量元素与健康研究，39(3)：48-50.]

LIU PF, QIN J, HAO SN, et al., 2022. Effects of selenium concentration, application stage and method on yield and grain selenium content of different millet varieties [J]. Crops, (2): 182-188. [刘攀锋，秦杰，郝爽楠，等，2022. 硒肥浓度、施用时期和施肥方式对不同谷子品种产量和籽粒硒含量的影响 [J]. 作物杂志，(2)：182-188.]

LIU Q, TIAN X, SHI YX, 2016. Effects of Se application on Se accumulation and transformation and content of gross protein and mineral elements in wheat grain [J]. Acta Agronomica Sinica, 42(5): 778-783.[刘庆，田侠，史衍玺，2016. 施硒对小麦籽粒硒富集、转化及蛋白质与矿质元素含量的影响 [J]. 作物学报，42(5)：778-783.]

LV HY, TIAN CY, WANG ZY, et al., 2015. Effects of exogenous selenium on growth and photosynthesis of *Apocynum venetum* L. seedlings [J]. Arid Land Geography, 38(1): 83-89. [吕海祥，田长彦，王梓宇，等，2015. 外源硒对罗布麻幼苗生长及光合作用的影响 [J]. 干旱区地理，38(1)：83-89.]

MILLER DD, WELCH RM, 2013. Food system strategies for preventing micronutrient malnutrition [J]. Food policy, 42: 115-128.

NARVAEZ-ORTIZ WA, BECVORT-AZCURRA AA, FUENTES-LAR LO, et al., 2018. Mineral composition and antioxidant status of tomato with application of selenium [J]. Agronomy, 8(9): 185.

NIE HL, HUANG SH, YANG JF, et al., 2023. Meta analysis of the effects of foliar Se application on grain yield, protein content, and Se accumulation of winter wheat [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 31(12): 1997-2010. [聂浩亮，黄少辉，杨军芳，等，2023. 叶面施硒对冬小麦籽粒产量、蛋白质含量和硒富集影响的 Meta 分析 [J]. 中国生态农业学报（中英文），31(12)：1997-2010.]

RAINA M, SHARMA A, NAZIR M, et al., 2021. Exploring the new dimensions of selenium research to understand the underlying mechanism of its uptake, translocation, and accumulation [J]. Physiologia Plantarum, 171(4): 882-895.

SCHIAVON M, NARDI S, DALLA VECCHIA F, et al., 2020. Selenium biofortification in the 21(st) century: status and challenges for healthy human nutrition [J]. Plant and Soil, 453(1-2): 245-270.

SCHIAVON M, PILON-SMITS EAH, 2017. The fascinating facets of plant selenium accumulation-biochemistry, physiology, evolution and ecology [J]. New Phytologist, 213(4): 1582-1596.

SUN GX, LI Y, LI G, et al., 2017. Climatic causes of the selenium-deficient soil belt in China [J]. Current Biotechnology, 7(5): 387-394. [孙国新，李媛，李刚，等，2017. 我国土壤低硒带的气候成因研究 [J]. 生物技术进展，7(5)：387-394.]

SUN FY, LI CC, WANG A, et al., 2017. Effect of sodium selenate application on concentrations of selenium and other minerals in grains of different wheat genotypes [J]. Journal of Triticeae Crops, 37(4): 559-564.

SUN X, YI Q, TANG SH, et al., 2023. Research progress on selenium nutrition in rice [J]. Chinese Journal of Soil Science, 54(1): 223-231. [孙星，易琼，唐拴虎，等，2023. 水稻硒营养研究进展 [J]. 土壤通报，54(1)：223-231.]

TAKAHASHI H, KOPRIVA S, GIORDANO M, et al., 2011. Sulfur assimilation in photosynthetic organisms: molecular functions and regulations of transporters and assimilatory enzymes [J]. Annual review of plant biology, 62(1): 157-184.

TAO J, LENG J, LEI X, et al., 2023. Effects of selenium (Se) uptake on plant growth and yield in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) [J]. Field Crops Research, 302: 109070.

WANG JY, JIANG C, ZHENG JG, 2006. Study on the effect of Se and Zn fertilizer on rice field and mineral nutrition in brown rice [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 22(3): 207-210. [王金英，江川，郑金贵，2006. 硒肥和锌肥对水稻产量及糙米矿质营养的影响 [J]. 中国农学通报，22(3)：207-210.]

WANG MY, YANG LZ, WANG D, et al., 2024. Effect of foliar spraying selenium fertilizer on the absorption and accumulation of selenium and other mineral elements in Rice [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 52(6): 150-154. [王梦园，杨良哲，汪丹，等，2024. 叶面喷施硒肥对水稻吸收累积硒及其他矿质元素的影响 [J]. 安徽农业科学，52(6)：150-154.]

WANG WX, CHANG BK, XIA Q, et al., 2024. Effects of foliar spraying selenium on physiological

characteristics, yeld and quality of flax [J]. Crops, (4): 130-137. [王文霞，畅博凯，夏清，等，2024. 叶面喷硒对胡麻生理特性、产量及品质的影响 [J]. 作物杂志，(4)：130-137.]

WANG XH, ZHANG JZ, HOU FF, et al., 2023. Effects of the position of Se fertilization position in soil on physiological characteristics and Se accumulation of foxtail millet [J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 43(2): 29-37. [王晓虎，张建珍，侯非凡，等，2023. 土施硒肥位置对谷子生理特性及硒积累的影响 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版)，43 (2)：29-37.]

WANG X, WU G, WANG Y, et al., 2024. Selenium enhancement strategy under precise fertilization in foxtail millet rhizosphere [J]. Heliyon, 10: e32764.

WEN Y, CENG L, ZHAO Z, et al., 2024. Transcriptome and co-expression network revealed molecular mechanism underlying selenium response of foxtail millet (*Setaria italica*) [J]. Frontiers in Plant Science, 15: 1355518.

WHITE PJ, 2016. Selenium accumulation by plants [J]. Annals of Botany, 117(2): 217-235.

WHITE PJ, 2018. Selenium metabolism in plants [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects, 1862(11): 2333-2342.

XUE C, LI L, GUO C, et al., 2023. Understanding the role of graphene oxide in affecting PAHs biodegradation by microorganisms: an integrated analysis using 16SrRNA, metatranscriptomic, and metabolomic approaches [J]. Journal of Hazardous Materials, 457: 131811.

YU K, LIU YX, WANG SM, et al., 2023. Effects of foliar spraying different selenium sources at filling stage on main traits, selenium content and rhizosphere soil physicochemical properties of rice [J]. Journal of Southern Agriculture, 54(4): 1086-1094. [余侃，刘永贤，汪盛明，等，2023. 灌浆期叶面喷施不同硒源对水稻主要性状、硒含量和根际土壤理化性质的影响 [J]. 南方农业学报，54(4)：1086-1094.]